

高精度无线传感器网络时间同步算法研究

庄祎梦¹, 贺光辉¹, 陈洪涛², 姜 勇²

(1 上海交通大学 微电子学院, 上海 200240; 2 国网上海市电力公司 电力科学研究院, 上海 200093)

摘 要: 泛洪式时间同步算法通过对发送节点和接收节点的时标对进行线性拟合, 估计接收节点相对于发送节点的时间同步参数, 从而修正接收节点的本地时间. 线性拟合算法的选择直接影响了同步的精度. 因此采用有限加权最小二乘法实现算法中的线性拟合. 有限加权最小二乘法相对于传统的最小二乘法, 增加了对旧数据点所带来的观察噪声的处理, 降低了观察噪声对同步精度的影响, 此外算法增加了对异常数据的处理, 避免了异常数据对同步精度的影响. 实验表明提出的算法有效地提高了同步精度.

关键词: 无线传感器节点; 时间同步; FTSP; 高精度

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2017)07—0075—04

Time Synchronization Algorithm of High Accuracy for Wireless Sensor Networks

ZHUANG Yi-meng¹, HE Guang-hui¹, CHEN Hong-tao², JIANG Yong²

(1 School of Microelectronics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2 Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200093, China)

Abstract: In Flooding Time Synchronization Protocol, several pairs of timestamps of the sender and receiver are collected to do linear regression at each synchronization period. Then it calculates related parameters including clock skew and clock offset, which are used to adjust the local clocks of the sensor nodes under synchronization. The choice of the linear regression algorithms has a direct influence on the accuracy of synchronization. The proposed algorithm replaces the common Least Square method with the Finite Weighted Least Square one to do linear fit, which realizes high-precision synchronization with observation noise of old timestamps considered. Besides, detection for abnormal time stamps is introduced, which avoids the influence of abnormal data points after filtering them. The experiment shows that the proposed algorithm effectively improves the synchronization accuracy.

Key words: wireless sensor node; time synchronization ; FTSP; high accuracy

1 引言

时间同步是使得整个传感器网络能够正常地进行协同工作的关键机制. 传感器网络自身协议的运行、调度、协同睡眠、数据融合、定位等都是建立在精确的时间同步的基础之上的. 具体来讲, 当采用测量声音的办法来测量节点到声源的距离以及声源的位置时, 对于传感器节点所获取的数据的时间精度要求显然是很高的; 同时, 如果在一个网络中希望能够

使得所有节点同时开始一项任务, 那么各个节点本地时间的同步和一致性也是有着严格要求的. 常见的时间同步算法有参照广播同步协议 (Reference Broadcasting Synchronization, RBS^[1]), 双向成对同步协议 (Time Pairwise Synchronization Network, TPSN^[2]), 泛洪式时间同步协议 (Flooding Time Synchronization Protocol, FTSP^[3]) 等. 这些算法在 Mica2 节点上进行验证, 文献[2]指出 TPSN 的同步精度为 16.9 μs , RBS 的同步精度为 29.1 μs , 文献

[3]指出 FTSP 在单跳网络中可以达到 $1.48 \mu\text{s}$ 的精度,在六跳网络中为 $3 \mu\text{s}$. 相对于其他算法,FTSP 算法更适用于高精度测距和定位中. 本文在传统的基于最小二乘的 FTSP 算法 (Least Square FTSP, LS-FTSP) 的基础上提出了基于有限加权最小二乘的 FTSP 算法 (Finite Weighted Least Square FTSP, FWLS-FTSP), 用加权最小二乘法来对算法中的数据进行线性拟合, 进一步提高了算法的精度, 并引入了异常数据过滤机制, 避免同步精度受异常数据的影响.

2 FTSP 时间同步算法

2.1 FTSP 同步算法

FTSP 算法是由 Vanderbilt 大学 Branislav Kusy 等于 2004 年提出的, 是使用单向广播消息实现发送节点与接收节点之间的时间同步^[4-5]. 广播消息形式如图 1^[3]所示.

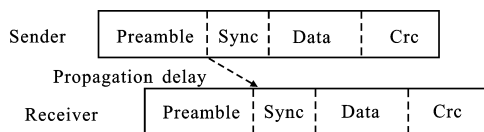


图 1 FTSP 算法数据包广播形式

发送节点在完成 SYNC 字节发送后在 MAC 层给以后发送的每个字节标记时间戳, 接收节点在接收完 SYNC 字节也做同样的标记, 这样在发送节点和接收节点处都获得了多个时间戳, 当消息传输完后, 接收节点获得若干时间对, 之后通过处理这些时间对来实现同步.

FTSP 算法对数据对的处理是建立在一阶时钟模型上的. 无线传感器网络的节点的时间模型可以用式(1)^[6]来定义.

$$C_i(t) = \frac{1}{f_0} \int_{t_0}^t f_i(t) dt + C_i(t_0) \quad (1)$$

式中, f_0 表示晶体振荡器的标准频率; t_0 指的是节点开始计时的物理时刻; t 是指外界的真实时间间隔; $f_i(t)$ 表示的是节点 i 在 t 时刻真实的晶体振荡器的频率; $C_i(t)$ 是指的节点 i 在 t 时刻本地时钟的计算函数.

FTSP 算法考虑到在短时间内每个晶振的频率相对稳定^[7], 因此节点 i 的本地时钟读数可以简化为以下公式:

$$C_i(t) = a_i \times (t - t_0) + b_i \quad (2)$$

式中, b_i 为 t_0 时刻节点 i 的时钟读数, 即 $C_i(t_0)$, a_i 为 f_i 与 f_0 的比值. 同样节点 j 的本地时钟读数为

$$C_j(t) = a_j \times (t - t_0) + b_j \quad (3)$$

由式(2)、(3)可以得到节点 j 和节点 i 的时间的线性关系.

$$C_j(t) = a_{ij} \times C_i(t) + b_{ij} \quad (4)$$

FTSP 算法中采用线性回归的目的即为求出式(4)中的参数 a_{ij} 和 b_{ij} , 用来修正 i 节点的本地时间 $C_i(t)$.

2.2 线性最小二乘

FTSP 算法中常用的数据处理方法是线性最小二乘法^[8]. 最小二乘法是一种应用很广泛的估计方法, 目的是求出一个无偏的且具有最小均方误差的估计量. 即使得被估计量与估计量之差在统计平均意义上取得最小值. 最小二乘法估计方法对观测数据没有任何概率假设, 即不需要任何先验知识, 只需被估计量的观测信号模型, 就可以实现信号参量的估计.

令 x_i 为观测向量, $\hat{h}_i$ 为观测矩阵, θ 为 M 维的被估计量, n_i 为观测噪声, 则线性观测方程为

$$x_i = \hat{h}_i \theta + n_i \quad (5)$$

记 $\mathbf{X} = [x_0 \ x_1 \ \cdots \ x_{L-1}]^T$ 为 L 次的观测向量, 对应的观测矩阵记为 $\mathbf{H} = [\hat{h}_0 \ \hat{h}_1 \ \cdots \ \hat{h}_{L-1}]^T$, 观测噪声向量 $\mathbf{N} = [n_0 \ n_1 \ \cdots \ n_{L-1}]^T$, 则 L 次的观测方程可以表示成:

$$\mathbf{X} = \mathbf{H}\theta + \mathbf{N} \quad (6)$$

假设观测噪声向量 $\mathbf{N}$ 的统计特性为

$$E(\mathbf{N}) = 0 \quad (7)$$

$$E(\mathbf{N}\mathbf{N}^T) = \mathbf{C}_N \quad (8)$$

则最小二乘构造的估计量 θ 使得估计误差 $J(\theta)$ 达到最小.

$$J(\theta) = (\mathbf{X} - \mathbf{H}\theta)^T (\mathbf{X} - \mathbf{H}\theta) \quad (9)$$

令 $J(\theta)$ 对 θ 进行矢量求导, 并令结果等于 0, 求得 θ 为

$$\theta = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{X} \quad (10)$$

3 基于有限加权最小二乘法的 FTSP 同步算法

3.1 有限加权最小二乘法

线性最小二乘法是假设每次的观测噪声 n_i 是一样的, 但是在无线传感器网络的每次同步过程中, 越旧的时标对当前的观测带来的噪声越大, 所以同等地对待各次观测量是不合理的. 加权最小二乘可以给予观测噪声小的观测量较大的权值, 令 $\mathbf{W} = \text{diag}(w_0, w_1, \cdots, w_{L-1})$ 为权重矩阵, 则线性最小二

乘使得误差函数 $J_w(\theta)$ 最小.

$$J_w(\theta) = (\mathbf{X} - \mathbf{H}\theta)^T \mathbf{W}(\mathbf{X} - \mathbf{H}\theta) \quad (11)$$

同样可以求得:

$$\theta = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{X} \quad (12)$$

当 $\mathbf{W} = \mathbf{C}_N^{-1}$ 时误差函数取得最小值. 由于观测噪声的方差很难准确得到,所以在算法实现中,令

$$\mathbf{W} = \text{diag}(r^{L-1}, r^{L-2}, \dots, r, 1) \quad 0 < r < 1 \quad (13)$$

则误差函数可以表示为

$$J(\theta) = \sum_{i=0}^{L-1} r^{L-i-1} (x_i - \hat{\mathbf{h}}_i^T \theta)^2 \quad (14)$$

基于有限加权最小二乘的 FTSP 算法中,每次只用最近的 K 对时标来进行拟合,即权重矩阵为

$$\mathbf{W} = \text{diag}(0, \dots, 0, r^{K-1}, \dots, r, 1) \quad (15)$$

若 Ts_i 为发送节点第 i 次同步时发送的时标, Tr_i 为接收节点第 i 次接收数据包时的本地时标,令 $x_i = Ts_i$, $h_i = [Tr_i \ 1]^T$, $\theta = [a \ b]^T$. 则式(14) 可以转换成:

$$J(\theta) = \sum_{i=L-K}^{L-1} r^{L-i-1} (Ts_i - a \times Tr_i - b)^2 \quad (16)$$

要令误差函数最小,则令:

$$\frac{\partial J}{\partial a} = -2 \sum_{i=L-K}^{L-1} r^{L-i-1} (Ts_i Tr_i - a Tr_i^2 - b Tr_i) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = -2 \sum_{i=L-K}^{L-1} r^{L-i-1} (Ts_i - a Tr_i - b) = 0 \quad (18)$$

记 $\Delta(\omega) = \sum_{i=L-K}^{L-1} r^{L-i-1} \omega_i$, 可以求得:

$$a = \frac{\Delta(Ts) \Delta(Tr) - \Delta(1) \Delta(Ts Tr)}{\Delta(Tr)^2 - \Delta(1) \Delta(Tr^2)} \quad (19)$$

$$b = \frac{\Delta(Ts) \Delta(Tr^2) - \Delta(Tr) \Delta(Ts Tr)}{\Delta(1) \Delta(Tr^2) - \Delta(Tr)^2} \quad (20)$$

3.2 FWLS-FTSP 算法

FWLS-FTSP 算法的同步流程如图 2 所示. 网络每隔 SyncCycle 的时间进行一次同步. 首先以网络中的 0 号节点为初始根节点. 根节点周期性地广播同步数据包. 步数据包的数据段包含 3 个部分: 发送时间标 TimeStamp, 根节点 RootID 和同步信息的序列号 SeqNum. TimeStamp 是节点发送数据包时在 MAC 层打的时标, RootID 是该节点所属的根节点的 ID, SeqNum 是同步数据包的序列号, 根节点每次发送新的同步信息时, 会更新一下序列号. 每个节点在同步开始时会启动一个计时器, 计时器的值 heartBeat 表示节点未收到消息的同步周期数. 当计时器的值超过设定值 TIMEOUT 时, 节点会将自己设置为根节点.

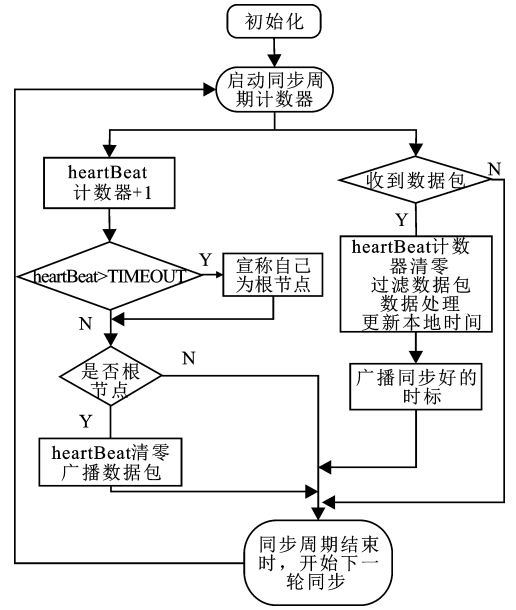


图 2 IWLS-FTSP 算法流程

当节点接收到数据包 SyncPacket 时, 需要对数据包进行过滤. 这是因为 FWLS-FTSP 采用泛洪方式广播同步信息, 一个节点的广播范围内的所有节点都能收到该节点的数据包, 这样每个节点在一个同步周期内会收到不止一个节点发出的数据包, 然而节点的存储能力有限, 所以算法中需要处理冗余的同步信息. FWLS-FTSP 中每个节点都保存了 highestSeqNum 和 myRootID 两个值, highestSeqNum 表示同步的轮数, myRootID 表示该节点所属的根节点号. 如果收到的同步数据包满足 ① RootID < myRootID 或 ② SeqNum > highestSeqNum && RootID = myRootID, 这个同步信息就被节点接收.

节点接收到同步数据包后, 用自己收到包时记录的本地时标 Tr_i 和数据包中携带的时标 Ts_i 更新线性回归表 Ts_table 和 Tr_table . 然后根据公式 (19) 和 (20) 求出拟合参数.

由于加权最小二乘法给予当前的数据以最大的权重, 若当前数据为异常数据, 那么会影响计算结果的准确性. 为了算法的稳定性, 算法中采用了异常数据点过滤机制. 针对时钟漂移率, 我们设定漂移率变化的阈值 $\Phi = 10^{-6}$, 即当用新数据求出时钟漂移和上一次求出的值相差超过 Φ 时, 判定新数据为异常数据, 应当过滤, 等到下一个同步周期再更新估计量 θ . 通过异常数据过滤机制, 可以避免异常数据对同步精度的影响. 整个数据接收处理过程由算法 1 描述.

算法 1 数据包接收处理算法

1 INPUT: SyncPacket

```

2  if SyncPacket.RootID < myRootID then
3      myRootID ← SyncPacket.RootID
4  else if SyncPacket.RootID > myRootID || SyncPacket.
      SeqNum ≤ highestSeqNum then
5      return
6  end if
7  end if
8  highestSeqNum ← SyncPacket.SeqNum
9  Ts ← SyncPacket.TimeStamp
10 Tr ← CurrentTime
11 if myRootID < myID then
12     heartbeat ← 0
13 end if
14 initialize  $\theta_{old}$  and  $\theta$ 
15 if highestSeqNum < K - 1 then
16     Ts_table[highestSeqNum] ← Ts
17     Tr_table[highestSeqNum] ← Tr
18 else
19     update Ts_table and Tr_table
20     calculate new  $\theta$  according to formula(19)(20)
21 end if
22 if  $|\theta - \theta_{old}| > \text{ERROR\_LIMIT}$  then
23      $\theta \leftarrow \theta_{old}$ 
24 end if

```

4 仿真与结果分析

在 NS2 中对算法进行仿真. NS2 是一种面向对象和离散时间驱动的模拟器. 它通过 Tcl 脚本语言来设置和模拟仿真环境、设置场景拓扑结构和初始化事件调度器;通过 C++ 拓展 NS2 原有的协议和添加新的协议.

在 NS2 网络仿真平台中搭建仿真环境:节点数为 30 个,随机分布在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的范围内,节点时钟漂移为 $-10 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ 间的均匀分布,同步精度以节点两两之间的时间差的均值衡量,同步 90 次,同步间隔为 20 s.

图 3 为基于最小二乘的 FTSP 算法和基于有限加权最小二乘的 FTSP 算法的同步结果的对比. 参与线性规划的时标对数 $K=8$. LS-FTSP 的同步误差为 $1.8 \sim 4.9 \mu\text{s}$. FWLS-FTSP 的同步误差为 $0.8 \sim 1.9 \mu\text{s}$. 通过对比可以看出 FWLS-FTSP 算法的同步精度比 LS-FTSP 高.

图 4 为参与线性规划的时间对数量 k 取不同值时的对比. 当 k 取值越大时,同步精度越高,但是这样每个节点需要存储更多的时间对,对传感器节点的存储空间是一种消耗. 一般情况下, k 取 6 即可.

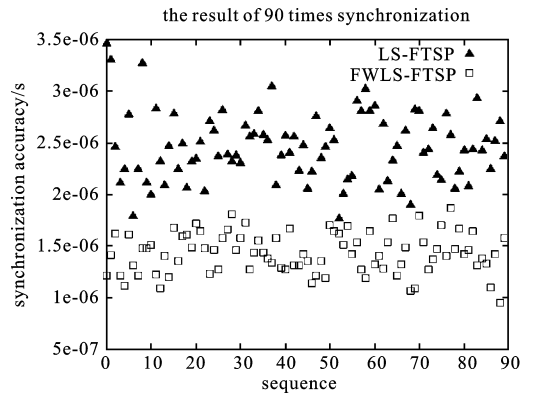


图 3 LS-FTSP、FWLS-FTSP 比较

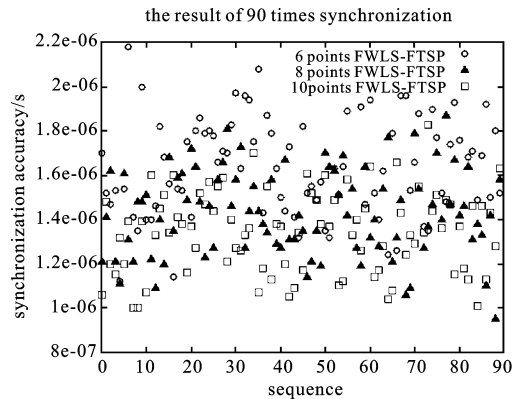


图 4 FWLS-FTSP 算法精度对比图

5 结束语

本文在传统的基于最小二乘的 FTSP 算法上,提出了基于有限加权最小二乘的 FTSP 算法. 并在同样的仿真平台和同样的环境参数下,对 LS-FTSP 算法和 FWLS-FTSP 算法进行了仿真,仿真结果表明 FWLS-FTSP 算法明显提高了同步精度.

进一步的研究可以从时钟建模上着手,目前的算法都是基于一阶时钟模型,若需要进一步提高精度,可以考虑更高阶数的时钟模型.

参考文献:

- [1] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2002, 36 (SD): 147-163.
- [2] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M B. Timing-sync protocol for sensor networks[C]// Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, 2003: 138-149.

(下转第 83 页)

5 结束语

本文阐述了某高性能 DSP 芯片中 DDR3 存储接口模块的物理设计工作,包括布局规划、时序分析等,在设计前期综合考虑了布线、时序、设计要求等多方面的因素,进行了合理的布局规划;在时序收敛阶段,分析了关键的时钟与路径结构并做出了针对性的手工规划,消除了各个模式下的时序违反并且满足设计文档的要求. 设计通过了等价性检查、DRC 和 LVS 验证,最终大小为 11.18 mm^2 ,功耗为 1.35 W ,设计频率为 533 MHz ,最大数据率为 $2\ 133\text{ Mb/s}$.

参考文献:

- [1] JEDEC . DDR3 SDRAM SPECIFICATION, JESD793D [R]. 2010 .
- [2] 万轶. 高性能 DDR3 存储控制器的研究与实现[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
- [3] 彭陈. DDR3 存储控制器的设计与实现[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.
- [4] 戴颀, 张浩, 杜丽, 等. 基于 SMIC40LL 工艺的 DDR 物理层 IP 设计[J]. 中国集成电路, 2013, 22(8): 18-22.

- [5] Krovvidy M, Sanaka V, Anand S, et al. DDR Timing closure: physical design and STA methodology[EB/OL]. [2016-02-09]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.84.4088>.
- [6] Kang U, Chung H J, Heo S, et al. 8 Gb 3-D DDR3 DRAM using through-silicon-via technology[J]. Solid-State Circuits, IEEE Journal of, 2010, 45(1): 111-119.
- [7] Pang Y. Floorplanning algorithms for vlsi physical design automation[D]. San Diego: University of California, 2000.
- [8] Wu G, Jia S, Wang Y, et al. An efficient clock tree synthesis method in physical design[C]// Electron Devices and Solid-State Circuits, 2009. IEEE, 2009: 190-193.

作者简介:

裴秉玺 男,(1994-),硕士研究生.研究方向为集成电路物理设计. E-mail:1059654424@qq.com.

李振涛 男,(1976-),博士,副研究员.研究方向为集成电路设计.

黄东昌 男,(1988-),硕士.研究方向为集成电路物理设计.

郭阳 男,(1971-),博士,研究员.研究方向为集成电路设计.

(上接第 78 页)

- [3] Maróti M, Kusy B, Simon G, et al. The flooding time synchronization protocol[C]// Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, 2004: 39-49.
- [4] Sommer P, Wattenhofer R. Gradient clock synchronization in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks. IEEE Computer Society, 2009: 37-48.
- [5] Noh K, Serpedin E, Qaraqe K. A new approach for time synchronization in wireless sensor networks: Pairwise broadcast synchronization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(9): 3318-3322.
- [6] Römer K, Blum P, Meier L. Time synchronization and calibration in wireless sensor networks[J]. Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures, 2005, 49: 199.

- [7] Wang F, Zeng P, Yu H. The design and realization of high-precision time synchronization protocol in wireless sensor networks based on FTSP[C]// Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress on. IEEE, 2010: 6983-6987.

- [8] 赵树杰, 赵建勋. 信号检测与估计理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 323-332.

作者简介:

庄祎梦 女,(1991-). 硕士.研究方向为集成电路设计、无线通信. E-mail:yimeng169@163.com.

贺光辉 男,(1982-),博士,副教授.研究方向为无线通信和多媒体系统的信号处理和 VLSI 架构设计.

陈洪涛 男,(1976-),高级工程师.研究方向为电力环境保护、网源协调、涉网电厂的技术监督质量评价.

姜勇 男,(1967-). 硕士,高级工程师.研究方向为电测量、涉网电厂的技术监督质量评价.